

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2020.06.009

## 聚/表二元复合驱油技术研究

浮历沛,廖凯丽,何岩峰,白金美

(常州大学 石油工程学院,江苏 常州 213164)

**摘要:**构筑了基于部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)、石油磺酸盐(PS)及烷醇酰胺(CDEA)的聚/表二元复合驱体系,在此基础上,通过填砂管驱油实验和微观驱油实验,研究了驱油效果和驱油机理。实验结果表明:驱体系中 HPAM(相对分子质量为 $(23\sim 26)\times 10^6$ )用量为 0.20%,复配表面活性剂( $m(\text{PS}):m(\text{CDEA})=1:3$ )用量为 0.20%;与水驱相比,聚合物驱和聚/表复合驱能够显著提高波及体积,最终采收率的增加幅度分别为 30.7%和 40.3%;相比单纯聚合物驱,表面活性剂通过降低油水界面张力,使原油易于乳化分散,形成 O/W 乳状液,提高洗油效率。

**关键词:**提高采收率;化学驱;界面张力;驱油机理

中图分类号:TE 3

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2020)06-0054-06

## Study on Polymer/Surfactant Compound Flooding Technology

FU Lipai, LIAO Kaili, HE Yanfeng, BAI Jinmei

(School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** The polymer/surfactant compound flooding system based on partially hydrolyzed polyacrylamide (HPAM), petroleum sulfonate (PS) and alkanolamide (CDEA) was constructed. By means of sandpack flooding tests and microscopic oil displacement tests, its EOR effect and mechanisms were studied. The experimental results showed that the dosage of polymer (with the relative molecular weight of  $(23\sim 26)\times 10^6$ ) in the optimal oil displacement system was 0.20%, and the dosage of mixed surfactant system ( $m(\text{PS}):m(\text{CDEA})=1:3$ ) was 0.20%. Compared with water flooding, polymer flooding and polymer/surfactant compound flooding could significantly improve the sweep volume, and the final recovery rate increased by 30.7% and 40.3%, respectively. Meanwhile, compared with polymer flooding, surfactants could reduce the oil-water interfacial tension (IFT), make crude oil prone to emulsify and disperse, form O/W emulsions, and improve oil displacement efficiency.

**Key words:** enhanced oil recovery; chemical flooding; interfacial tension; displacement mechanism

收稿日期:2020-06-12。

作者简介:浮历沛(1988—),男,河南新乡人,博士,讲师。E-mail:fulipei@cczu.edu.cn

引用本文:浮历沛,廖凯丽,何岩峰,等.聚/表二元复合驱油技术研究[J].常州大学学报(自然科学版),2020,32(6):54-59.

据统计,中国普通稠油油藏水驱后的采收率仅为13.5%。因此,如何进一步提高采收率是这类稠油油藏开发中亟待解决的技术难题<sup>[1-2]</sup>。国内外研究表明,普通稠油油藏中剩余油的分布主要是连续的、可流动的。因此,提高这类稠油油藏采收率的关键在于提高驱替流体的波及系数<sup>[3]</sup>。

水驱中加入聚合物可增大驱油体系的黏度从而达到增大波及系数的目的,是提高原油采收率的重要方法<sup>[4]</sup>。WANG针对黏度为1 450 mPa·s的加拿大西部稠油分别在均质和非均质的填砂管中进行聚合物驱实验,常温下注入0.5 PV的聚合物溶液,采收率分别提高了14%~20%和8%~12%<sup>[5]</sup>。ASGHARI等<sup>[6]</sup>对不同稠油(1 000~8 400 mPa·s)进行聚合物驱试验,指出聚合物浓度必须要超过一个临界值,岩心的渗透率越高聚合物驱的采收率越高,且注入聚合物的速度越小,其采收率越高。张贤松等<sup>[7]</sup>利用数值模拟方法,指出适用聚合物驱的最佳地下原油黏度应低于100 mPa·s。表面活性剂可通过降低油水界面张力、改变岩石润湿性等方法提高驱油液的洗油效率。唐钢<sup>[8-9]</sup>认为当储层渗透率相同时,驱油剂/原油间的界面张力越低,采收率越高。石油磺酸盐是最常见的驱油用表面活性剂,烷醇酰胺不仅具有优异的降低油水界面张力的能力,同时还具有较好的抗盐和耐酸碱性,是驱油用剂的较优选择<sup>[10-11]</sup>。

本文构筑了基于石油磺酸盐及烷醇酰胺的聚/表二元复合驱体系,通过物理模拟实验评价了其驱油特性,并利用微观驱油模型研究了其驱油机理。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

稠油样品60℃时黏度为280 mPa·s,酸值为1.431 mg·g<sup>-1</sup>。从收集到的3种聚合物和6种表面活性剂中优选聚/表复合驱体系。所用聚合物均为部分水解聚丙烯酰胺(HPAM),分别为I型HPAM(相对分子质量为(18~20)×10<sup>6</sup>)、II型HPAM(相对分子质量为(23~26)×10<sup>6</sup>)、III型HPAM(相对分子质量为(25~26)×10<sup>6</sup>)。所用表面活性剂分别为石油磺酸盐(PS)、烷醇酰胺(CDEA)、十二烷基二甲基甜菜碱(DDB)、椰油酰胺丙基羟磺基甜菜碱(CPHS)、月桂酰胺丙基甜菜碱(LPB)、月桂酰胺甜菜碱(LB)。实验所用溶液均由模拟地层水配制,其总盐度为2 141.4 mg·L<sup>-1</sup>。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 聚合物溶液流变性测定

用模拟地层水配制HPAM溶液,通过流变仪测定聚合物溶液在30℃时的流变性。

#### 1.2.2 界面张力测定

采用TX-500界面张力仪测定油水界面张力,测定20℃条件下各表面活性剂溶液与原油之间的动态界面张力。

#### 1.2.3 驱油效率评价实验

首先使用石英砂填制填砂管(直径为25 mm,长度为200 mm),然后进行驱替实验,步骤如下:①用地层水饱和填砂管,测定渗透率,计算孔隙度;②以恒定速度注入稠油至出口端含水率小于2%,计算饱和度;③水驱至产出液体含水率小于2%,然后注入0.5 PV的化学剂段塞,再转后续水驱至产出液含水率小于2%。地层水和化学剂段塞都以0.5 mL/min的速度注入。

#### 1.2.4 微观驱油实验

实验所用微观玻璃模型(25 mm×25 mm)为亲水性。微观驱替实验步骤如下:①玻璃模型抽真空并饱和地层水;②在地层温度下饱和原油并老化24 h;③注入用曙红染红的化学剂溶液(注入速度为

0.003 mL/min),并采集整个驱替过程的图像;④分析驱替图像,计算采收率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 驱油体系构筑

#### 2.1.1 驱油用聚合物筛选

分别评价了质量分数为 0.10%,0.15%,0.20%,0.25%,0.30% 时 3 种驱油用聚合物溶液的流变性,结果如图 1 所示。

由图 1 可知,相同用量时 II 型 HPAM 具有更好的增黏特性,因此选其用于构筑聚/表复合驱油体系。考虑到现场应用、注入难易程度以及经济效益问题,确定其用量为 0.20%。

#### 2.1.2 驱油用表面活性剂筛选

##### 1) 表面活性剂类型优选

石油磺酸盐是化学驱中最常用的表面活性剂,其具有良好的界面性质,同时与原油具有较好的配伍性,在三次采油中具有重要地位,因此首先对石油磺酸盐的用量进行优选。实验测定了不同质量分数(0.1%,0.2%,0.3%)的石油磺酸盐溶液与地层原油的界面张力,实验结果如图 2 所示。

由图 2 可知,单独使用石油磺酸盐并不能使油水界面张力达到超低,因此考虑使用石油磺酸盐与其它表面活性剂进行复配。实验测定了石油磺酸盐与烷醇酰胺、十二烷基二甲基甜菜碱、椰油酰胺丙基羟磺基甜菜碱、月桂酰胺丙基甜菜碱、月桂酰胺甜菜碱等表面活性剂的复配体系降低界面张力的能力,其中表面活性剂的质量分数为 0.2%,石油磺酸盐与其他表面活性剂的质量比为 1:1,实验结果如图 3 所示。

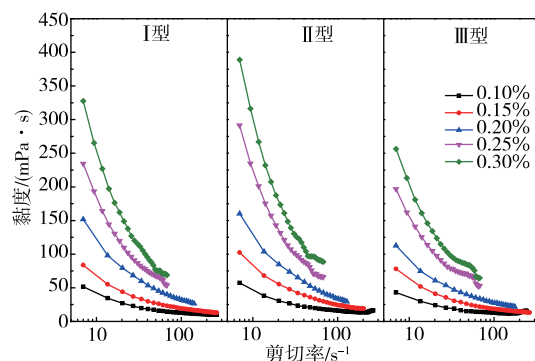


图 1 不同聚合物流变性对比

Fig.1 Comparison of rheological properties of different polymers

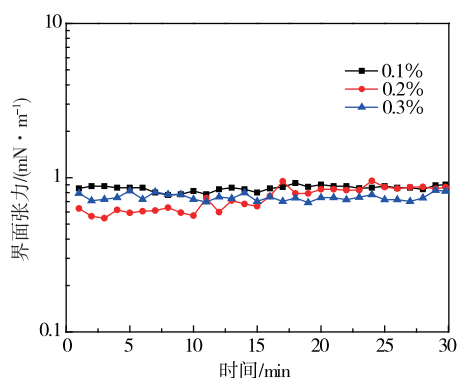


图 2 不同质量分数石油磺酸盐溶液与原油界面张力曲线

Fig.2 IFT curves between crude oil and brine with different mass fractions of PS

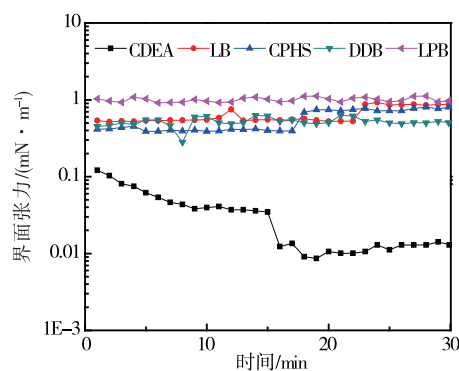


图 3 石油磺酸盐和不同表面活性剂复配溶液与原油界面张力曲线

Fig.3 IFT curves between crude oil and surfactant compound solutions of PS with different surfactants

由图 3 可知,在上述 5 种表面活性剂中,仅有烷醇酰胺与石油磺酸盐的复配溶液可使油水界面张力

达到超低状态,因此使用烷醇酰胺与石油磺酸盐复配溶液作为驱油用表面活性剂体系。

## 2) 表面活性剂用量优选

针对石油磺酸盐与烷醇酰胺复配体系,考察了两者质量比分别为1:2,1:3时,复配表面活性剂溶液与原油的界面张力,其中表面活性剂的质量分数为0.2%,实验结果如图4所示。

由图4可知,石油磺酸盐与烷醇酰胺的复配表面活性剂溶液在两种质量比时与原油的界面张力分别为  $6.52 \times 10^{-3}$ ,  $4.69 \times 10^{-3}$  mN/m,满足超低界面张力要求。

但仍需确定质量比为1:2,1:3的复配表面活性剂溶液的适用范围,因此分别考察了不同质量分数的表面活性剂复配体系与原油的界面张力特性,结果如图5和图6所示。

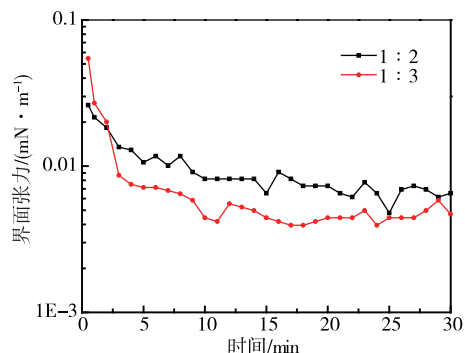


图4 0.20%的表面活性剂复配体系( $m(\text{PS}):m(\text{CDEA})=1:2, 1:3$ )与原油界面张力曲线

Fig. 4 IFT curves between crude oil and 0.20% surfactant compound solutions ( $m(\text{PS}):m(\text{CDEA})=1:2, 1:3$ )

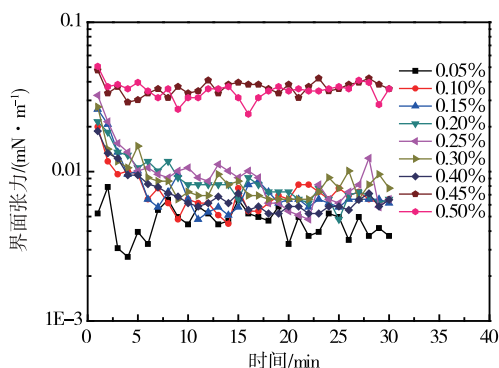


图5 不同质量分数的表面活性剂复配体系( $m(\text{PS}):m(\text{CDEA})=1:2$ )复配溶液与原油界面张力曲线

Fig. 5 IFT curves between crude oil and surfactant compound solutions ( $m(\text{PS}):m(\text{CDEA})=1:2$ ) with different mass fraction

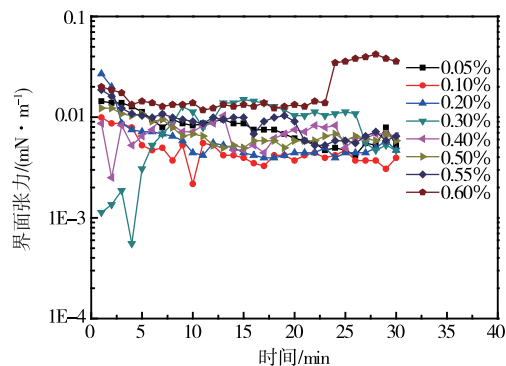


图6 不同质量分数的表面活性剂复配体系( $m(\text{PS}):m(\text{CDEA})=1:3$ )复配溶液与原油界面张力曲线

Fig. 6 IFT curves between crude oil and surfactant compound solutions ( $m(\text{PS}):m(\text{CDEA})=1:3$ ) with different mass fraction

由图5和图6可知,当石油磺酸盐与烷醇酰胺的质量比为1:2时,可使油水界面张力降低至超低范围的表面活性剂质量分数为0.05%~0.40%;当石油磺酸盐与烷醇酰胺的质量比为1:3时,可使油水界面张力降低至超低范围的表面活性剂质量分数为0.05%~0.55%。表明两种复配比例的复配体系均具有较宽的适用范围,而相比之下,比例为1:3的复配溶液具有更大的浓度使用范围。通过洗油实验可以确定质量分数为0.20%的复配表面活性剂溶液(PS和CDEA的质量比为1:3)洗油效果更好,因此推荐该复配表面活性剂溶液作为驱油效率研究的表面活性剂体系。综上,通过对驱油用聚合物和表面活性剂的筛选,最终确定了聚/表复合驱油体系为0.20% HPAM(相对分子质量为 $(23 \sim 26) \times 10^6$ )和0.20%复配表面活性剂溶液( $m(\text{PS}):m(\text{CDEA})=1:3$ )。

## 2.2 驱油实验结果

针对在60℃条件下黏度为280 mPa·s的稠油,通过填砂管驱替实验对由聚合物、表面活性剂构成

的复合体系的驱油效果进行了评价,主要对比研究了水驱、单纯聚合物驱、聚合物/表面活性剂二元复合驱的提高采收率效果,其中驱油剂的注入量为 0.5 PV,实验结果如图 7 所示。

由图 7 可知,水驱的采收率约为 38.9%;注入聚合物段塞后采收率提高了 30.7%,最终采收率达 69.6%;而注入聚合物和驱油剂复配段塞 0.5 PV 后继续水驱,采收率提高了 40.3%,最终采收率达 79.2%。由此说明,相比聚合物驱,聚/表二元复合驱在其基础上仍可使采收率提高约 10%,最终采收率接近 80%,即聚/表二元复合驱更适合该油藏条件。

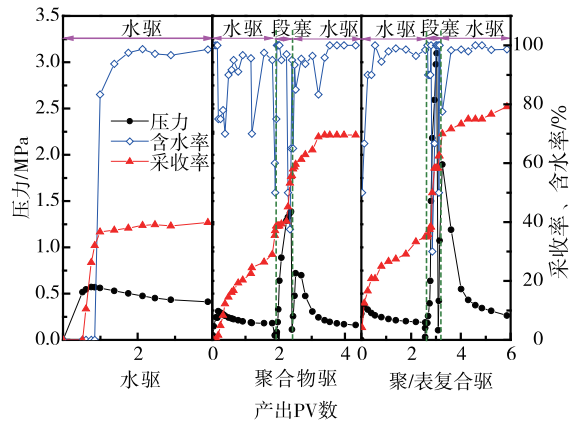


图 7 驱油实验结果

Fig.7 Results of flooding tests

### 2.3 微观驱油机理分析

为了解释水驱、聚合物驱、聚/表/二元复合驱的效果,进一步开展了微观可视化驱油实验,驱油结束时的波及体积如图 8 所示。

由图 8 可知,对于水驱而言,注入水沿着模型入口和出口端对角线(即压力最低的方向)迅速推进,注入水只能将对角线附近的原油驱出,垂直于对角线方向的大片剩余油被绕流,水驱结束时,波及体积仅限于入口和出口端对角线附近,因而水驱采收率较低。出现这一结果的原因在于水油流度比较大,注入水主要沿着已经形成的高渗透率通道前进,无法波及到大片的剩余油。对于聚合物驱而言,聚合物溶液的波及体积始终呈增大趋势,垂直于对角线部分的大量剩余油被波及到并被驱出。其机理在于聚合物的加入增加了驱油液的黏度,降低了水油流度比,有效地减小了指进现象对波及体积的影响。对于聚/表二元复合驱而言,其波及体积明显大于水驱突破时的波及体积。同时发现,单纯聚合物驱与聚/表二元复合驱在扩大波及体积方面相差不大。但表面活性剂的加入则可增加驱油液的洗油效率,表面活性剂可将孔喉壁上的剩余油分散成小油珠然后通过孔喉,也可通过拉丝作用将附着在孔喉壁上的剩余油分散到水相中,使油膜变薄(见图 9),随着注入体积的增加,此高含油饱和度带的范围逐步扩大,最后,富集的油相以水包油乳状液的形式被驱替出来,从而提高原油采收率。由此可知,聚/表复合体系驱油机理包括两个方面:聚合物的加入能增大驱替液黏度,降低水油流度比,提高波及系数;表面活性剂则可通过降低油水界面张力,使原油易于发生乳化分散,形成 O/W 乳状液,提高洗油效率。

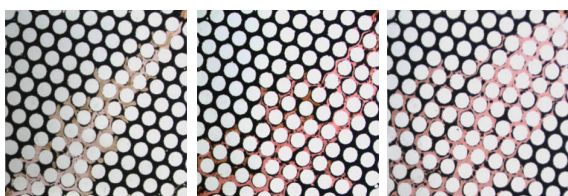


图 8 水驱(左)、聚合物驱(中)、聚/表二元复合驱(右)的波及体积对比

Fig.8 Comparison of swept volume of water flooding (left), polymer flooding (middle), and S/P compound flooding (right)

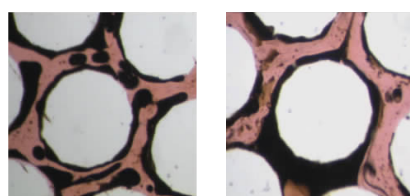


图 9 聚/表二元复合驱的洗油效果

Fig.9 Oil washing effect of polymer/surfactant compound flooding

### 3 结 论

1) 石油磺酸盐与烷醇酰胺复配可使普通稠油的界面张力降低至超低状态,据此确定了聚/表二元复合驱油体系为 0.20% HPAM(相对分子质量为  $(23 \sim 26) \times 10^6$ ) 和 0.20% 复配表面活性剂溶液 ( $m(\text{PS}):m(\text{CDEA})=1:3$ )。

2) 填砂管物理模拟实验表明:60℃条件下,水驱、聚合物驱、聚/表二元复合驱采收率依次增加。相对水驱,两种化学驱采收率增加幅度分别为 30.7% 和 40.3%,表明尽管单纯聚合物驱已具有较好的驱油效果,但与表面活性剂复配后,仍可使采收率增大 10%,即聚/表二元复合驱更适合该普通稠油油藏化学驱。

3) 微观驱替实验表明:在聚/表二元复合驱中,聚合物的加入增加了驱替流体的波及体积,故能增加水驱采收率;表面活性剂的加入则可提高驱油液的洗油效率,从而进一步增大采收率。

### 参考文献:

- [1]毛源,唐存知,葛际江,等. 河口油田普通稠油油藏化学驱技术研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2018, 20(6): 46-48, 72.
- [2]裴海华,张贵才,葛际江,等. 化学驱提高普通稠油采收率的研究进展[J]. 油田化学, 2010, 27(3): 114-120.
- [3]FU L P, ZHANG G C, GE J J, et al. Study on organic alkali-surfactant-polymer flooding for enhanced normal heavy oil recovery[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, 508: 230-239.
- [4]孙龙德,伍晓林,周万富,等. 大庆油田化学驱提高采收率技术[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 636-645.
- [5]WANG J, DONG M. A laboratory study of polymer flooding for improving heavy oil recovery[C]//Canadian International Petroleum Conference. Calgary: Petroleum Society of Canada, 2007.
- [6]ASGHARI K, NAKUTNYY P. Experimental results of polymer flooding of heavy oil reservoirs[C]//Canadian International Petroleum Conference. Calgary: Petroleum Society of Canada, 2008.
- [7]张贤松,丁美爱,陆相沉积稠油油藏聚合物驱关键油藏条件研究[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(1): 127-129.
- [8]唐钢,李华斌,苏敏. 复合驱界面张力与驱油效率的关系研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(3): 84-86, 111-112.
- [9]王业飞,仲东,徐蕊睿,等. 二元复合体系乳化性能及其对普通稠油的驱替效果[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(5): 79-852.
- [10]廖凯丽,葛际江,浮历沛,等. 聚/表二元复合驱提高普通稠油水驱后残余油采收率的研究[J]. 石油化工, 2016, 45(12): 112-118.
- [11]LI K, JING X, HE S, et al. Laboratory study displacement efficiency of viscoelastic surfactant solution in enhanced oil recovery[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(6): 4467-4474.

(责任编辑:殷丽莉)